



ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАННЯ

(Теория сварочных процессов: Учеб. для вузов по спец. «Оборуд. и технология сварочн. пр-ва» // В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др.; Под ред. В.В. Фролова. – М.: Высш. Шк., 1988. – 559 с.)

Автор: д. т. н. Лузан С.О.

Лекция 11. Плавление основного металла

**(тема «Нагрев и плавление металла при
сварке»)**

План лекции

- 1. Формы сварочной ванны при различных способах сварки**
- 2. Температура сварочной ванны**
- 3. Тепловая эффективность процесса сварки**

1. Формы сварочной ванны при различных способах сварки

Плавление основного металла при сварке осуществляется с целью соединения между собой свариваемых деталей.

Идеальным в отношении затрат теплоты представляется такое тепловыделение в источнике, при котором обеспечивалась бы минимальная глубина проплавления сопрягаемых поверхностей, а присадочный металл не требовался бы вовсе.

Наиболее близко этому требованию отвечает высокочастотная сварка и некоторые виды контактной сварки (точечная, шовная, рельефная). В перечисленных способах сварки существенная роль в образовании соединения принадлежит давлению, что позволяет плавить основной металл незначительно.

Ограничимся рассмотрением случаев плавления основного металла в способах сварки без применения давления.



1. Формы сварочной ванны при различных способах сварки

При электронно-лучевой сварке удастся получить минимальное проплавление основного металла при сварке встык вплоть до толщин, измеряемых сотнями миллиметров. Сварочная ванна в поперечном сечении имеет форму, близкую к конусу, а в плоскостях, перпендикулярных лучу, – близкую к эллипсу.

При электрошлаковой сварке также можно получить минимальное проплавление основного металла, но для ведения шлакового процесса необходим зазор, который затем заполняется присадочным металлом. Сварочная ванна может быть мелкой или глубокой в зависимости от скорости сварки и мощности источника. Форма ванны при электрошлаковой сварке зависит от соотношения между количествами теплоты, поступающими в основной металл непосредственно от шлака и от опускающегося в металлическую ванну перегретого электродного металла.

При использовании дуговых, плазменных и газопламенных источников теплоты при сварке встык металла небольшой толщины форма ванны близка к форме изотермической линии температуры плавления, рассчитанной для движущегося линейного источника теплоты в пластине.

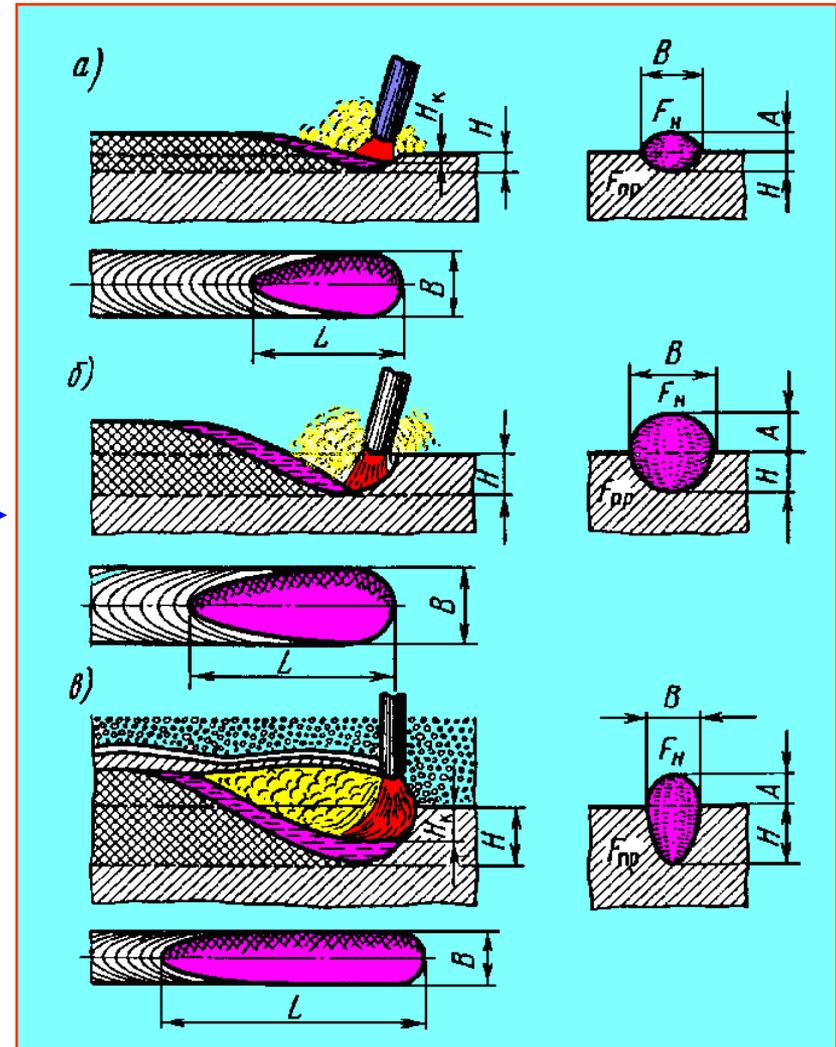


1. Формы сварочной ванны при различных способах сварки

С ростом толщины металла разница в размерах ванны на верхней и нижней поверхностях листа становится все более значительной, а при некоторой толщине полное проплавление уже не достигается, как показано на рис. 1.

Рис. 1 - Формы сварочной ванны при дуговой сварке:
 а - поверхностная дуга;
 б - погруженная дуга;
 в - дуга под флюсом

Для увеличения проплавляющей возможности указанных источников используют разделку кромок. Особенности различных источников нагрева в части их проплавляющей способности обычно оценивают экспериментальным путем.



1. Формы сварочной ванны при различных способах сварки

Ванну характеризуют следующими параметрами:

L – длина ванны, B – ее ширина, H – глубина проплавления, H_k – глубина кратера. Очертание зоны проплавления характеризуют относительной глубиной проплавления H/B или обратной ей величиной – коэффициентом формы проплавления $\psi_{пр} = B/H$, а также коэффициентом полноты проплавления $\mu_{пр} = F_{пр} / (HB)$, где $F_{пр}$ – площадь проплавления. Значения $\mu_{пр}$ обычно находятся в пределах 0,6...0,8. Для дуговой сварки под флюсом характерно большое H/B , но при дуговых способах сварки оно все же не превышает 3. Очертание зоны наплавки характеризуют коэффициент формы валика $\psi_v = B/A$, а также коэффициент полноты валика $\mu_v = F_n / (AB)$, где A – высота шва, F_n – площадь наплавки.

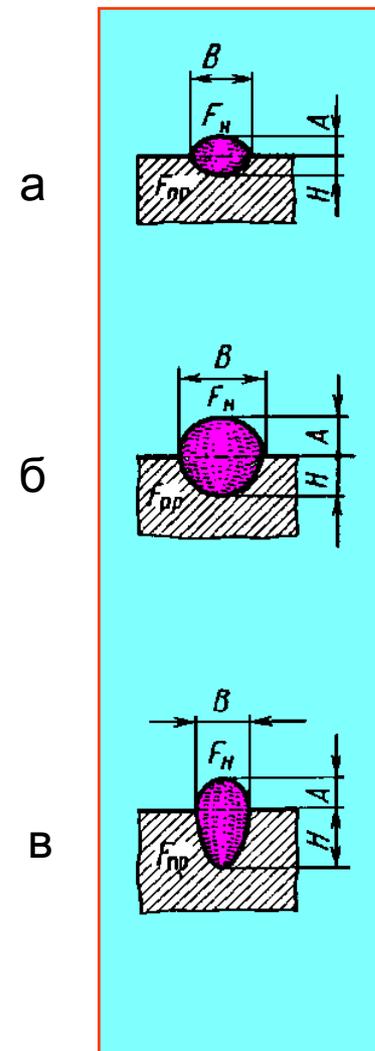


Рис. 1



1. Формы сварочной ванны при различных способах сварки

Расчеты позволяют лишь приближенно оценить размеры ванны при дуговых способах сварки. При наплавке на поверхность массивного тела длину ванны L можно получить из уравнения (1) для точечного источника, приняв $r=0$, а $\Delta T = \Delta T_{пл} - T_n$ и используя при этом соотношение $tv=L$ (2):

$$\Delta T = \frac{q_n}{2\pi\lambda t} e^{-\frac{(y^2+z^2)}{4at}} \quad (1)$$

$$L = \frac{q}{2\pi\lambda (T_{пл} - T_n)} \quad (2)$$

Формула (2) показывает, что длина ванны на поверхности массивного тела от скорости сварки не зависит. Опытные данные в целом указывают на справедливость этой формулы, хотя и обнаруживают некоторую зависимость длины ванны от скорости. Аналогично можно оценить и ширину ванны.

1. Формы сварочной ванны при различных способах сварки

При заполнении разделки в случае многослойной сварки форма ванны имеет меньшее значение. Более существенно полное сплавление наплавляемого металла с ранее уложенными слоями и отсутствие шлаковых включений.

Форма и размеры ванны при прочих равных условиях (мощности источника и скорости сварки) существенно зависят от характера подачи и температуры присадочного металла.

При подаче в ванну холодной непрерывной или рубленой на мелкие части проволоки ванна становится короче. Поэтому оценка L по формуле (2) справедлива лишь для идеализированных условий.



2. Температура сварочной ванны

Температуры жидкого металла в различных точках сварочной ванны могут сильно различаться между собой. У границы с твердым металлом температура жидкого металла близка к температуре его плавления (табл. 1).

Таблица 1 – Температура плавления и кипения различных металлов, К, при атмосферном давлении

Металл	Температура плавления	Температура кипения
Магний	$923 \pm 0,5$	1323 ± 5
Алюминий	933 ± 1	2590 ± 50
Медь	1356 ± 3	2630 ± 30
Железо	1803 ± 5	3320 ± 50
Титан	1998 ± 10	3770 ± 100
Ниобий	2730	4000
Молибден	2895 ± 25	5000 ± 200
Вольфрам	3660 ± 60	6200 ± 200

Она может быть как несколько ниже $T_{пл}$ вследствие кристаллизационного переохлаждения, так и выше при больших скоростях движения жидкого металла вдоль твердой границы.

2. Температура сварочной ванны

Как следует из рис. 1, расплавляющийся на передней кромке ванны жидкий металл поступает в ее заднюю часть, проходя вдоль боковых поверхностей и дна ванны. При этом скорости движения металла могут превышать скорость сварки в 1,5...10 раз.

Максимальные температуры жидкого металла существенно зависят от источника теплоты. При лучевых способах сварки, особенно при значительной концентрации энергии в пятне нагрева, металл может достигать температуры кипения (см. табл. 1).

Дуговые и плазменные источники энергии также способны создавать на поверхности металла довольно высокие температуры, например у сталей до 2300 К. При электрошлаковом процессе температура жидкого присадочного металла, проходящего через активную зону шлаковой ванны, где выделяется теплота, достигает температуры шлака, которая в средней по высоте части шлаковой ванны составляет 2100...2200 К, а на поверхности шлака около 2000 К.



2. Температура сварочной ванны

При способах сварки плавлением происходит интенсивное перемешивание жидкого металла как вследствие его движения из передней части ванны в заднюю, так и под влиянием других воздействий источника теплоты на жидкий металл. Происходит интенсивный теплообмен между отдельными порциями различно нагретого жидкого металла, а также вследствие теплоотвода в твердый металл.



По этой причине энергетическое состояние ванны целесообразно характеризовать не только возможными максимальными и минимальными температурами, но и средней температурой жидкого металла. Она зависит от режима сварки (тока, напряжения, скорости сварки), характера подачи присадочного металла, устойчивости дуги и положения ее активного пятна.

Пример

Средняя температура ванны при аргонно-дуговой сварке алюминиевого сплава АМг6 может изменяться от 920 до 1050 К при возрастании тока от 300 до 450 А при $U_d = 14$ В и от 1070 до 1200 К при $U_d = 8$ В, в то время как температура плавления сплава АМг6 составляет около 890 К.

3. Тепловая эффективность процесса сварки

Во многих случаях, в особенности при сварке легированных сталей и различных сплавов, требуется прежде всего получение определенных механических свойств и структуры металла околошовной зоны и шва, которые зависят от длительности пребывания металла выше определенной температуры, скорости охлаждения в необходимом интервале температур, повторного нагрева и многих других особенностей термического цикла сварки.

Поэтому оценка эффективности процесса сварки по энергетическим критериям часто оказывается второстепенной. Однако для сталей, мало чувствительных к воздействию термического цикла сварки, оценка эффективности различных режимов сварки по энергетическим затратам необходима.



Следует различать сварные соединения двух основных крайних типов: соединения, в которых преобладает наплавленный металл (заштрихованные участки на рис. 2, сверху), и соединения, образуемые преимущественно в результате расплавления основного металла (рис. 2, внизу).

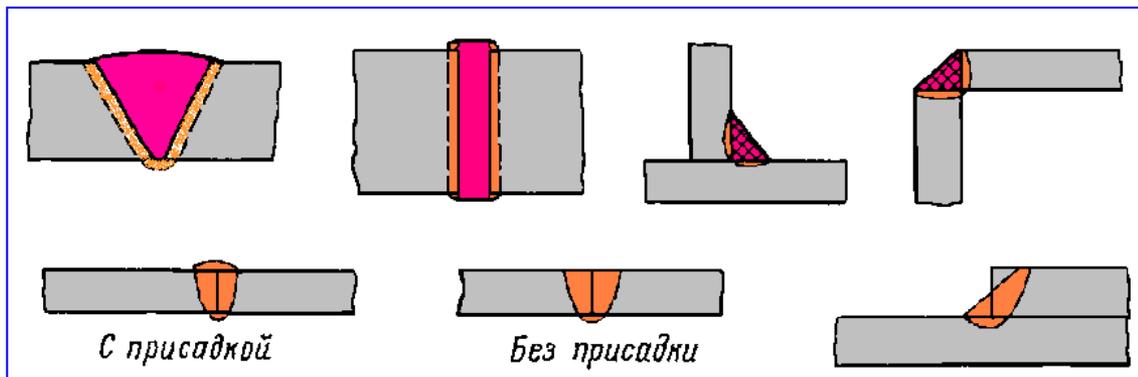


Рис. 2 – Поперечные сечения сварных соединений (штриховыми линиями показаны границы расплавления)

Для последнего типа соединений, например стыкового, тепловую эффективность процесса целесообразно характеризовать удельной затратой количества теплоты на единицу площади свариваемой поверхности:

$$\varepsilon = UI / F_{св1} \quad (3)$$

где $F_{св1}$ – площадь соединения, свариваемая за 1 с; для однопроходной сварки встык, например $F_{св1} = v\delta$; UI – полная тепловая мощность сварочного источника.

3. Тепловая эффективность процесса сварки

14

Эффективность использования тепловой энергии движущихся источников теплоты характеризуют также так называемым термическим к. п. д. процесса проплавления основного металла:

$$\eta_t = vF_{пр}\rho h_{пл} / q \quad (4)$$

Коэффициент η_t выражает отношение условного теплосодержания $vF_{пр}\rho h_{пл}$ проплавленного за единицу времени основного металла к эффективной **тепловой мощности источника теплоты**. Величина теплосодержания в единице массы металла $h_{пл}$ включает в себя также скрытую теплоту плавления, затрачиваемую на переход металла из твердого в жидкое состояние.

Здесь принято, что лишь теплота, истраченная на плавление металла, израсходована полезно, а остальная часть, ушедшая на подогрев металла, окружающего ванну, истрачена бесполезно. Расчетное определение η_t для точечного и линейного источников теплоты соответственно в полу-бесконечном массивном теле и в пластине проводят по формулам (5) и (6).

$$\Delta T_{пр} = \frac{q}{2\pi\lambda R} e^{-\frac{v}{2a}(R+x)} \quad (5)$$

$$\Delta T_{пр} = \frac{q}{2\pi\lambda\delta} e^{-vx/(2a)} K_0\left(\frac{vr}{2a} \sqrt{1 + \frac{4ba}{v^2}}\right), \quad (6)$$

где K_0 — функция Бесселя 1-го рода нулевого порядка;

$$b = \frac{2\alpha}{c\rho\delta} \quad (\text{см. п. 5.2 и 6.1}).$$



3. Тепловая эффективность процесса сварки

По ним определяют площадь $F_{пр}$ в выражении (4), ограниченную изотермой $\Delta T = \Delta T_{пл} - T_n$. Для точечного источника η_t возрастает с ростом безразмерного критерия $\varepsilon_3 = qv/(a^2\rho h_{пл})$, т. е. термический к. п. д. выше у мощных дуг, движущихся с высокой скоростью. Однако при $\varepsilon_3 \rightarrow \infty$ не может быть выше $1/e = 0,368$.



Соответственно для линейного источника теплоты в пластине η_l возрастает с ростом безразмерного критерия $\varepsilon_2 = q/(\delta a \rho h_{пл})$, но не может быть более $\sqrt{2/(\pi e)} = 0,484$ в случае предельно мощных линейных источников теплоты, т. е. при $q/\delta \rightarrow \infty$.



3. Тепловая эффективность процесса сварки

Полный тепловой к. п. д. проплавления $\eta_{\text{пр}}$ выражает отношение $vF_{\text{пр}}\rho h_{\text{пл}}$ ко всей (полной) тепловой мощности сварочного источника теплоты UI .
Источники теплоты, когда они используются для соединений, формирование которых происходит в основном в результате наплавки металла (см. рис. 2, вверху), целесообразно оценивать по полному тепловому к. п. д. наплавки

$$\eta_{\text{н}} = vF_{\text{н}}\rho h_{\text{пл}} / (UI) \quad (7)$$

где $F_{\text{н}}$ – площадь наплавки.



Задание для самостоятельного изучения:

Сварка трением

Теория сварочных процессов: Учеб. для вузов по спец. «Оборуд. и технология сварочн. пр-ва» // В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др.; Под ред. В.В. Фролова. – М.: Высш. Шк., 1988. – (С. 248-249 с.)





Кафедра технології металлов и матеріалознавства

Лузан Сергей Алексеевич

E-mail: khadi.luzan@gmail.com

г. Харків, ул. Петровського, 25, ХНАДУ, КАФЕДРА ТМ и М

Тел. 097-174-19-15